

# 生態圏を含む地球気候システムの超長期数値シミュレーションに関する研究

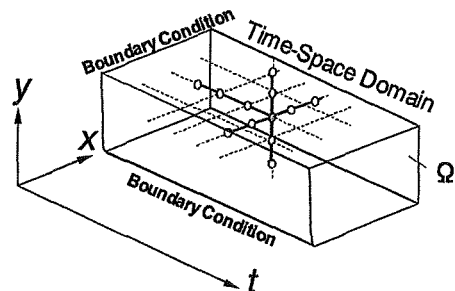
著者	若嶋 振一郎
号	51
学位授与番号	2156
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/37535">http://hdl.handle.net/10097/37535</a>

氏 名	わかしま しんいちろう
授 与 学 位	若嶋 振一郎
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成18年 3月 8日
最 終 学 歴	学位規則第4条第2項
学 位 論 文 題 目	平成13年3月
論文審査委員	生態圏を含む地球気候システムの超長期数値シミュレーションに関する研究
主査	東北大学教授 齋藤 武雄
査読員	東北大学教授 小林 秀昭
	東北大学教授 中村 維男
	東北工業大学教授 田中 正之

## 論文内容要旨

### 第1章 序 論

21世紀は人類活動に基づく二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を主因とする地球温暖化による気候変動の顕在化が懸念されている。従来の数値シミュレーションによる予測では、主に大気中のCO<sub>2</sub>濃度倍増時(約100年後)の気温上昇に注目しているが、地球表層に存在する生態圏の複雑な効果などを含めた気候変動を検討するには、未だ解明すべき点が多く、また、非常に長期間の変動をシミュレートする必要がある。本論文は、人為的CO<sub>2</sub>排出に伴う地球温暖化に及ぼす陸上・海洋生態系の効果の研究において、1000年～10000年に亘って超長期数値積分を可能にする高速ソルバー(Time-Space Method; TSM) (図1, 2)を用いた高効率数値気候モデルおよび計算コードを開発し、その定式化・解法および数値計算結果を纏めたもので全編6章からなる。



### 第2章 地球温暖化問題の現状と理解

第2章では、現在における、1)地球温暖化のメカニズム、2)地球温暖化問題に対する世界的な枠組み、3)これまでに得られている過去および現在までの科学的知見と将来予測、の各項目について整理し、最後に今後の課題と展望について考察した。地球温暖化による気候変動は全地球的な範囲にわたるため、温室効果ガス排出削減には、それぞれの国々が産業・経済・エネルギー消費などの構造を見直し、具体的な削減努力を行うとともに、国際的な法的拘束力をもつ枠組みを設けて着実に排出削減効果が期待できるようにする必要があると考える。

- Time Incorporation into Spatial Coordinates
- Arbitrary Time Step is Available
- Great Reduction of Computing Time

図1 Time-Space Method の概念図

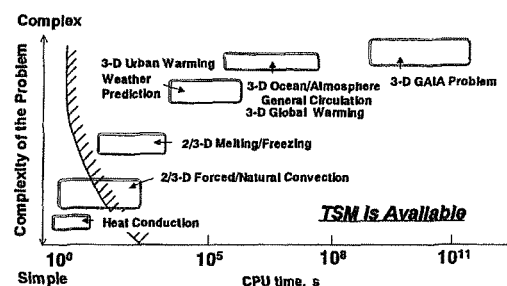


図2 Time-Space Method の適用範囲

### 第3章 長期気候変動シミュレート専用数値地球モデルの開発

本章ではこの新しいコンセプトを持つ数値解法に基づいた、100年～1000年(場合によっては10000年)オーダーの長期気候変動の研究に適した高効率数値地球気候モデルの開発を行った。まず、計算のコアとなるTSMにつ

いて説明を行い(図1, 2), また従来の類似的時空間領域を用いた計算方法との比較なども合わせて行った。さらに, 本研究で開発した数値気候モデルの位置づけについて述べ, 各数値モデルの詳細説明を行った。次いで, 各数値モデルによる気候再現実験の計算結果に基づき, その計算性能について論じた。以下に本章で得られた主な知見をまとめる。

1) 高効率数値解法であるタイムスペース法(TSM)に基づく長期気候シミュレート専用数値モデル(大気, 海洋, 陸面, 海水)をそれぞれ新たに作成した。計算時間としては, 市販のPC-WS程度を用いて, 3次元大気モデルが80年/日, 3次元海洋モデルが100年/日程度であった。数値モデルの基礎方程式等の変更により, 氷床の成長・衰退や氷期・間氷期の変動のような, より長い周期(例えば1000年~10万年)をもつ現象にも十分適用が可能であると考えられる。

2) 大気モデルおよび陸面モデルの性能実験を行い, 計算結果を示すとともに, その基本性能について考察した。実際の大気構造に定性的に似た計算結果となっているが, 赤道域の大気下層で実際よりも気温が高い結果になっており, これは今後の課題である(図3)。

3) 海洋モデルの性能実験を行い, 計算結果を示すとともに, その基本性能について考察した(図4)。海表面で現実的なフラックスを与える限り, モデルは安定な(気候ドリフトのない)循環を形成できた。ただし, 鉛直循環については, 観測値に一致しない所もあり, とくに鉛直循環に影響を及ぼす混合モデルや鉛直解像度などについてさらに検討する必要がある。

4) 鉛直1次元海氷熱力学モデルおよび鉛直1次元陸面モデルの性能実験を行い, 与えられた周期的気象データ(太陽放射, 大気放射, 顕熱, 潜熱, 降雪など)の基での Annual サイクル実験を行って, その計算結果を示し, エネルギー・質量のバランスを崩すことなく, 周期境界条件の下で周期解が得られることを確認した。

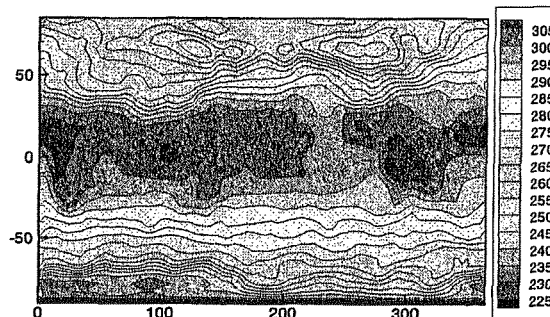


図3 大気大循環モデルの計算例(地表面気温,K)

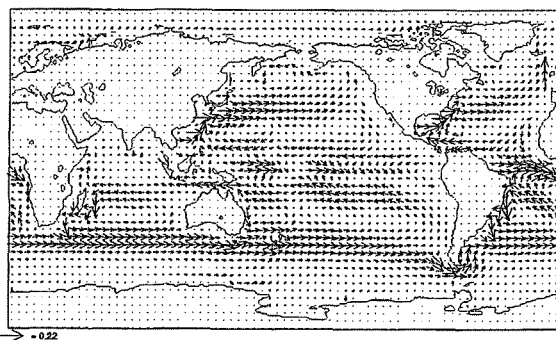


図4 海洋大循環モデルの計算例  
(速度ベクトル線図,m/s)

#### 第4章 地球温暖化の数値シミュレーション

地球温暖化シミュレーションの例として, 水惑星を対象とし, 本研究で作成した大気大循環モデルと簡単な海洋混合層モデルを用いて計算を行った。シナリオの2点(大気CO<sub>2</sub>濃度が290ppmvと1250ppmv)の平衡状態を計算し, その比較を行う感度実験を行って以下の知見を得た(図5)。

1) 大気CO<sub>2</sub>濃度が290ppmvから1250ppmv程度に増加した場合, 大気境界層付近での温度上昇は5~6℃程度であるが, 逆に赤道域ではほとんど温度上昇が見られない結果になった。一方, 大気上層では10~14℃の温度低下になることが判った。これは, 従来の計算結果と整合的である。

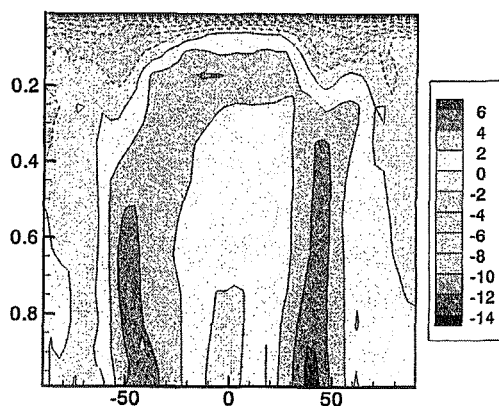


図5 東西平均気温の変化(単位:℃)  
(中緯度大気下層では気温上昇(実線),  
大気上層では気温低下(破線))

2) 東西風は、中緯度大気上層にかけて最大10m/s 程度の風速の増加が見られる一方で、10m/s 程度の風速の減少する部分が見られた。また、赤道域上空で湿度が増える結果が得られた。これは、気温上昇とともに、対流活動が活発になり、対流圏界面の上昇をもたらしていると考えられる。

3) 大気 CO<sub>2</sub>濃度が290ppmv から1250ppmv まで増加した場合、赤道域の降水量と中緯度の蒸発量が増えることが判った。一方、下向き正味長波放射は、中緯度で80~100W/m<sup>2</sup>程度の増加が見られたが、逆に減る部分もあり、複雑な変化を示すことがわかった。

今回は、海洋混合層モデルの条件下で地球温暖化の予測を行った。将来的には地表面での熱収支を正しく考慮した大気海洋結合モデルを利用して評価する必要がある。

## 第5章 生態圏を加味した超長期数値シミュレーション

本章では、これまでの章で開発してきた数値気候モデルに、炭素循環を基本とした陸面および海洋生態圏の数値モデル(図6, 7)を追加し、鉛直 1 次元モデルに簡略化した上で、人類が化石燃料を使い切ったという仮定のもとに、どのような変化が地球環境に生ずるかを数値的に予測した。

具体的には、人類が地球上の推定究極埋蔵量(EUR)を使い切ったと仮定したときに大気 CO<sub>2</sub> 濃度が 1250ppmv になると仮定し、そこから本研究で利用した生態系モデルでどのように CO<sub>2</sub> の吸収が行われるかを 1000 年間の計算を行った。

計算では、1000 年で 80~160ppmv 程度の吸収効果を持つという結果が得られた(図8)。一方、海表面でのガス交換ピストン速度を 10 倍にした場合は、1000 年間で 450ppmv 程度吸収される結果となった。これを、海洋の緩衝効果の観点から

考えてみると、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度に直すと最大でも僅か 17ppmv 程度しか吸収できないことがわかった。実際の海洋混合層では表面でのみ大気との CO<sub>2</sub> 平衡状態になり、鉛直方向 100m に一様化するとは限らないため、実際の吸収はさらに小さい値になると言える。すなわち、海洋の緩衝効果から考えた場合、一度 1250ppmv に増加した大気 CO<sub>2</sub> 濃度はほとんど変わらないという結果になると考えられる。従って、本章の数値計算では吸収速度をかなり過剰に見積もっている結果と言える。この理由としては、表層での物質の鉛直拡散パラメータを過剰に見積もっている可能性があることと、鉛直 1 次元モデルにしたことにより深層部分が非常に大きな炭素リザーバー(溶解・分解)として働いてしまったことが考えられる。

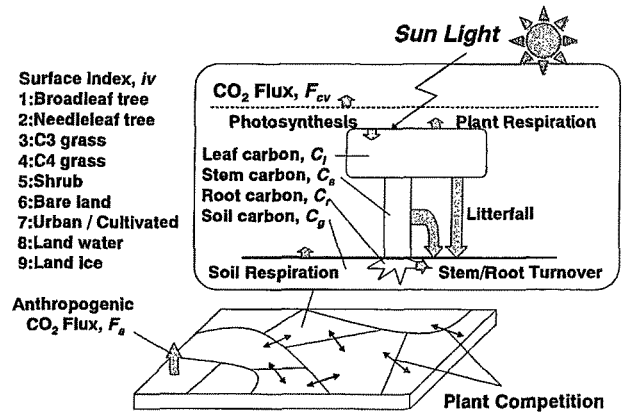


図6 陸上生態圏モデル(Cox, 2001)

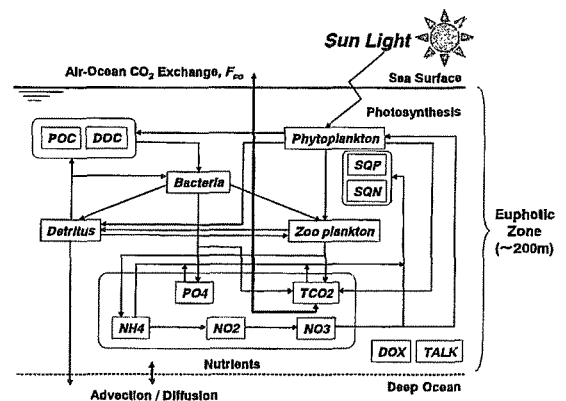


図7 海洋生態圏モデル(Nakata, 1993)

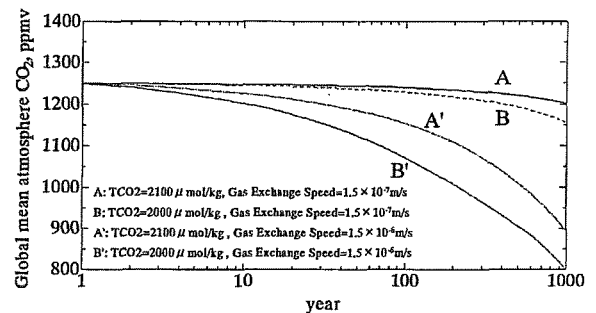


図8 海洋による CO<sub>2</sub> 吸収効果

## 第6章 結 論

本研究では、地球環境問題の主要な課題である地球温暖化と生態圏の効果を研究テーマとして、まず、TSM を利用した効率的な数値気候モデルおよび計算コードを作成し、個々の数値モデルを用いた数値実験を行ってその結果を示した。次に、幾つかの仮定の下での地球温暖化予測数値シミュレーションを行った。さらに鉛直 1 次元地球気候モデルを用いた生態圏の CO<sub>2</sub> 吸収効果に関する超長期数値シミュレーションを行った。

以下に、主な知見を述べる。

- 1) TSM を利用した高効率数値気候モデルの開発を行い、大気大循環モデル、海洋大循環モデル、陸面モデル、海氷熱力学モデルから成る高効率の地球気候システムの数値計算コードを構築した。本モデルの計算時間としては、市販の PC ワークステーションを用いて、3 次元大気大循環モデルが 80 年/日、3 次元海洋大循環モデルが 100 年/日程度であった。数値モデルの基礎方程式等の変更により、より長い周期(例えば 1000 年～10 万年)をもつ現象である氷床の成長・衰退シミュレーションや氷期・間氷期の変動シミュレーションにも適用が可能であると考えられる。
- 2) 提示したモデルの妥当性の検証のため、個々の数値モデルを利用して数値シミュレーションを行って、その計算結果を定性的に確認した。まず、大気モデルおよび陸面モデルの性能実験を行い、計算結果を示すとともに、その基本性能について考察した。また、海洋モデルの性能実験を行い、計算結果を示すとともに、その基本性能について考察した。海面で熱や運動量のフラックスを与える限りにおいて、モデルは安定な循環を形成できた。ただし、現実の気候の再現性に関して不十分な部分があり、今後さらに改善すべきである。また、鉛直 1 次元の陸面過程モデル、海氷熱力学モデルの構築を行い、エネルギー・質量のバランスを崩すことなく、周期境界条件の下で周期解が得られることを確認した。
- 3) 簡略化した計算条件の下で、作成した数値モデルによる地球温暖化平衡実験を行った。大気 CO<sub>2</sub> 濃度が 1250ppmv 程度に増加した場合、290ppmv の場合と比較して、中緯度大気境界層付近での温度上昇は 5～6℃ 程度であるが、逆に赤道域ではあまり温度上昇が見られない結果になった。一方、大気上層では 10～14℃ の温度低下になることが判った。これは、従来の研究における計算結果と整合的である。東西風は、中緯度大気上層にかけて最大 10m/s 程度の風速の増加が見られる一方で、10m/s 程度の風速の減少する部分が見られた。また、赤道域上空で湿度が増える結果が得られた。これは、気温上昇とともに、対流活動が活発になり、対流圏界面の上昇をもたらしていると考えられる。また、赤道域の降水量と中緯度の蒸発量が増えることが判った。一方、下向き正味長波放射は、中緯度で 80～100W/m<sup>2</sup> 程度の増加が見られたが、逆に減る部分もあり、複雑な変化を示すことがわかった。
- 4) 上述の数値気候モデルに加え、陸面上の植物生態圏モデルおよび海洋の生態圏モデルを用いた数値計算コード作成し、これらの数値モデルを利用して人類が地球上の推定究極埋蔵量を使い切ったと考えたときに大気 CO<sub>2</sub> 濃度が 1250ppmv になると仮定し、そこから生態系モデルの効果でどのように CO<sub>2</sub> の吸収が行われるかを、簡易的な鉛直 1 次元地球気候モデルによって 1000 年間の計算を行った。計算では、海洋の流動を考慮していないが 1000 年で 80～160ppmv 程度の吸収効果を持つという結果が得られた。一方、海表面でのガス交換速度を 10 倍にした場合は、1000 年間で 450ppmv 程度吸収される結果となった。一方、海洋の緩衝効果の観点から考えてみると、海洋表層 100m だけを考えても大気中 CO<sub>2</sub> 濃度に直すと最大でも僅か 17ppmv 程度しか海洋は吸収できない。実際の海洋混合層では表面でのみ大気との CO<sub>2</sub> 平衡状態になるため、実際の吸収はさらに小さい値になると言える。すなわち、海洋の緩衝効果の観点に立てば、一度 1250ppmv に増加した大気 CO<sub>2</sub> 濃度はほとんど変わらないという重要な結果になる。

人類の過去 100 年に亘る化石燃料の大量消費に起因する大気中の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) 濃度増加に伴う地球温暖化が進行し、ハリケーンや台風などの異常気象の顕在化が懸念されている。

本論文は、21 世紀最大の課題と目される地球温暖化に対して、とくに、1000 年～10000 年に亘る超長期シミュレーションを行い、地球温暖化に及ぼす人類起源  $\text{CO}_2$  増加と陸上および海洋生態系の効果を明らかにしようとしたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章は、序論であり、これまでの地球温暖化の歴史を概観し、数値モデリングや数値計算上の問題点などを述べ、地球温暖化問題に対する未解明な事象を整理するとともに、本研究の位置付けなどを述べている。

第 2 章では、地球温暖化のメカニズム、同問題に対する世界的な枠組みやこれまでに得られている科学的知見と将来予測などを整理・統合し、今後の課題と展望について述べている。これは重要な知見である。

第 3 章では、1000 年～10000 年の超長期積分を可能とする高速ソルバーであるタイムスペース法 (TSM) に基づく長期気候専用数値モデルを新たに開発している。まず、コアとなる TSM について詳述し、各数値モデルによる気候再現実験の計算結果に基づいて、その計算性能について論じている。通常の市販 PC・WS でも、3 次元海洋モデルが 100 年/日の計算スピードを有することから、将来、氷期・間氷期の気候変動のような 10 万年サイクルの現象にも十分適用が可能であることを示している。これは、重要な成果である。

第 4 章では、水惑星を対象とした大気大循環モデルと簡単な海洋混合層モデルを用いて、地球温暖化シミュレーションを行っている。とくに、 $\text{CO}_2$  濃度が 290ppmv から 1250ppmv に増加した場合、大気下層では 5～6℃の温度上昇であるが、大気上層では 10～14℃の温度低下となることを示している。これは有用な知見である。

第 5 章では、これまでの地球気候モデルに炭素循環を基本とした陸面および海洋生態圏の数値モデルを追加して、鉛直 1 次元モデルとして、人類が化石燃料を使い切ったという仮定のもと、どのような地球環境変化が生起されるかを予測している。海洋の緩衝効果を考えると、一旦増加した  $\text{CO}_2$  濃度は、1000 年後でもほとんど減少しないことを指摘している。これは、人類にとって重要な示唆を与えている。

第 6 章は、結論である。

以上、要するに本論文は、21 世紀の最大課題である地球温暖化について、1000 年～10000 年に亘る超長期数値シミュレーションを行って、大気中  $\text{CO}_2$  濃度の生態圏による吸収効果など、新しい知見・示唆を明らかにしたもので、機械工学および環境工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。